

ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ КРАЕВОГО КОНТРАСТА ЗРЕНИЯ

Доц. А. Г. Мурашко, инж. В. Я. Сердюченко

Харьковский институт радиоэлектроники

Известно, что зрительная система человека обладает специальным механизмом, осуществляющим выделение и подчёркивание контура изображения. Для облегчения анализа изображений при построении технических опознающих устройств необходимо наделить их свойствами, присущими зрительной системе человека. В этом плане представляет интерес изучение определенных механизмов органа зрения с целью получения алгоритмов, лежащих в основе преобразования информации. Известное явление краевого контраста и механизм, осуществляющий подчеркивание контура изображения, играют важную роль в технике. Нет необходимости доказывать, что получение алгоритма функционирования механизма краевого контраста дает возможность построить техническое устройство, функционирующее в соответствии с заданным алгоритмом и преобразующее информацию о зрительной картине так, как это делает зрительная система человека.

В работах [1, 2] предложена математическая модель переработки информации в зрительной системе человека, в том числе модель краевого контраста. Символическое представление модели показано в виде некоторой схемы (рис. 1) и системы алгоритмов, описывающих функционирование (закон преобразования входной информации) отдельных ее блоков:

Блок 1 P = U, (1)

Блок 2 V = c lg dP, (2)

Блок 3 - n^2 (d^2S/dx^2 + d^2S/dy^2) + S = k_k V, (3)

Блок 4 B = V - S. (4)

Здесь U(x, y) — входной сигнал, пропорциональный яркости зрительной картины;

B(x, y) — выходной сигнал, пропорциональный светлоте зрительного ощущения.

Функции P(x, y), V(x, y), S(x, y) обозначают некоторые промежуточные сигналы преобразования зрительной информации.

Если яркость зрительной картины является функцией координаты x, то уравнение (3) имеет решение

S(x) = (k_k / 2n) integral from -infinity to infinity of V(xi) e^(-|xi-x|/n) dxi, (5)

где xi — переменная интегрирования.

Для доказательства применимости сформулированных алгоритмов сравним теоретические и экспериментальные реакции зрительной системы

и модели на различные типы входных сигналов, являющихся классическими при исследованиях реакций зрительной системы. Назовем их условно «скачок яркости», «двойной скачок яркости», «полоска» и «бесконечная лесенка».

Заметим, что при предъявлении зрительных картин, состоящих из полей сравнения, отличающихся по яркости на величину $\Delta U = 10\%$, справедлива т. н. линеаризованная модель, которая отличается от приведенной выше функционированием второго блока, осуществляющего преобразование информации в соответствии с алгоритмом

$$V = cP + d,$$

$$\text{или, если } P = U, \text{ то } V = cU + d. \quad (6)$$

Определим реакцию модели на зрительную картину типа «скачок яркости», т. е.

$$U(x) = \begin{cases} U_1 & \text{при } x \leq 0; \\ U_2 & \text{» } x > 0. \end{cases} \quad (7)$$

Светлота зрительного ощущения может быть найдена из (1), (4), (5), (6) и запишется в виде

$$B(x) = \begin{cases} B_1 - \Delta B e^{\frac{x}{n}} & \text{при } x \leq 0, \\ B_2 + \Delta B e^{-\frac{x}{n}} & \text{» } x > 0, \end{cases} \quad (8)$$

Рис. 1.

где

$$B_1 = (1 - k_k) V_1;$$

$$B_2 = (1 - k_k) V_2;$$

$$\Delta B = \frac{1}{2} k_k \Delta V; \quad (9)$$

k_k — постоянная интенсивности контраста;

n — постоянная затухания краевого контраста.

На рис. 2, а и б представлены диаграммы изменения яркости U зрительной картины и светлоты B зрительного ощущения в функции координаты x , из которых видно, что граница раздела двух полей различной яркости подчеркнута с двух сторон.

Определим реакцию модели на зрительную картину типа «двойной скачок яркости», т. е.

$$U(x) = \begin{cases} U_1 & \text{при } x \leq -\frac{\Delta x}{2}; \\ U_2 & \text{» } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}; \\ U_3 & \text{» } x > \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (10)$$

Решение алгоритмов модели (1), (4), (5), (6) при условии (10) имеет вид

$$B(x) = \begin{cases} (1 - k_k) V_1 - k_k \Delta V e^{\frac{x}{n}} \operatorname{ch} \frac{\Delta x}{2n} & \text{при } x < -\frac{\Delta x}{2}; \\ (1 - k_k) V_2 - k_k \Delta V e^{\frac{-\Delta x}{2n}} \operatorname{sh} \frac{x}{n} & \text{» } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}; \\ (1 - k_k) V_3 + k_k \Delta V e^{\frac{x}{n}} \operatorname{ch} \frac{\Delta x}{2n} & \text{» } x > \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (11)$$

Диаграммы изменения яркости зрительной картины и светлоты зрительного ощущения показаны на рис. 3, а и б. Из рисунка видно, что две границы раздела полей с различной яркостью оказываются подчеркнутыми с обеих сторон. Такое подчеркивание границ наблюдается и в психофизическом эксперименте в виде краевого контраста.

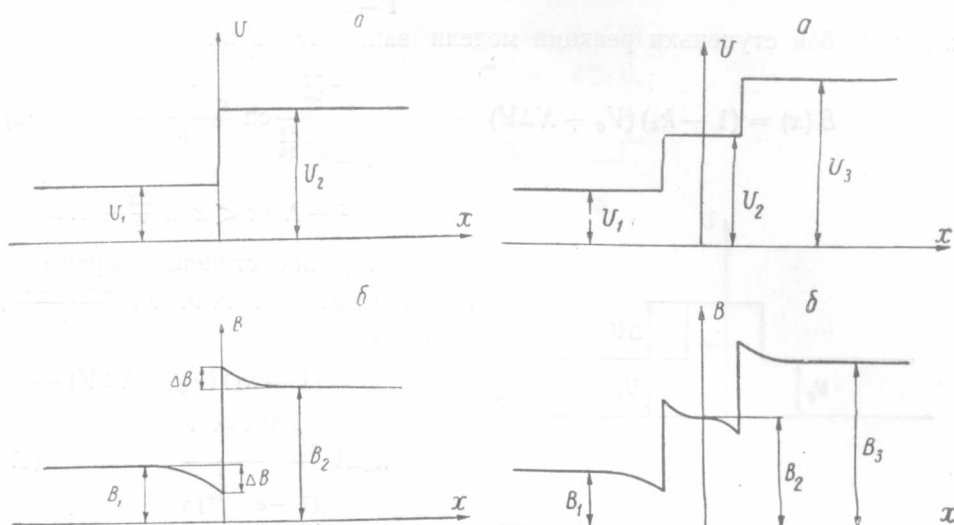


Рис. 2.

Рис. 3.

Определим реакцию модели на зрительную картину, типа «полоска», т. е.

$$U(x) = \begin{cases} U_0 & \text{при } x \leq -\frac{\Delta x}{2}; \\ U_0 + \Delta U & \text{» } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}; \\ U_0 & \text{» } x > \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (12)$$

Решение алгоритмов (1), (4), (5), (6) с учетом (11) имеет вид

$$B(x) = \begin{cases} (1 - k_k) V_0 - k_k \Delta V e^{\frac{x}{n}} \operatorname{sh} \frac{\Delta x}{2n} & \text{при } x \leq -\frac{\Delta x}{2}; \\ (1 - k_k) V_0 + \Delta V - k_k \Delta V \left(1 - e^{-\frac{\Delta x}{2n}} \operatorname{ch} \frac{x}{n} \right) & \text{при } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}; \\ (1 - k_k) V_0 - k_k \Delta V e^{-\frac{x}{n}} \operatorname{sh} \frac{\Delta x}{2n} & \text{при } x > \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (13)$$

На рис. 4, а и б показаны диаграммы изменения яркости зрительной картины и светлоты зрительного ощущения, из которых видно, что границы «полоски» подчеркнуты. Такой же эффект наблюдается и в психофизическом эксперименте.

Определим реакцию модели на зрительную картину типа «лесенка»:

$$U_N(x) = U_0 + N\Delta U \quad \text{при } -\frac{\Delta x}{2} + N\Delta x < x \leq \frac{\Delta x}{2} + N\Delta x, \quad (14)$$

где N — номер ступеньки.

Решение алгоритмов (1), (4), (5), (6) с учетом (14) для средней ступеньки $N = 0$ при $N \rightarrow \infty$ имеет вид

$$B(x) = (1 - k_k) V_0 - k_k \Delta V \frac{e^{-\frac{\Delta x}{2n}}}{1 - e^{-\frac{\Delta x}{2n}}} \operatorname{ch} \frac{x}{n}, \quad (15)$$

а для любой ступеньки реакция модели запишется в виде:

$$B(x) = (1 - k_k) (V_0 + N\Delta V) - k_k \Delta V \frac{e^{-\frac{\Delta x}{2n}}}{1 - e^{-\frac{\Delta x}{2n}}} \operatorname{ch} \frac{x - N\Delta x}{n}, \quad (16)$$

$$\text{при } -\frac{\Delta x}{2} + N\Delta x < x \leq \frac{\Delta x}{2} + N\Delta x.$$

Для узких ступенек, пренебрегая высшими членами $\operatorname{ch} \frac{x - N\Delta x}{n}$, получим

$$B(x) = (1 - k_k) (V_0 + N\Delta V) - k_k \Delta V \frac{e^{-\frac{\Delta x}{2n}(x - N\Delta x)}}{(1 - e^{-\frac{\Delta x}{2n}}) n}, \quad (17)$$

$$\text{при } -\frac{\Delta x}{2} + N\Delta x < x \leq \frac{\Delta x}{2} + N\Delta x.$$

Для узких и мелких ступенек можно произвести замену типа

$$e^x = 1 + a.$$

Тогда

$$B(x) = (1 - k_k) (V_0 + N\Delta V) - \frac{k_k \Delta V}{\Delta x n} (2n - \Delta x) (x - N\Delta x). \quad (18)$$

Диаграммы изменения яркости зрительной картины и светлоты зрительного ощущения показаны на рис. 5, а и б. Из них видно, что, как и во всех предыдущих случаях, границы каждой ступеньки подчеркнуты.

Все проведенные эксперименты подтверждают справедливость линеаризованной модели краевого контраста в качественном отношении, но не дают возможности произвести строгое количественное сравнение ее реакций и реакций глаза.

Количественно можно оценить подчеркивание контура, используя сознание в качестве нуль-прибора, отмечающего равенство или неравенство светлоты на различных участках зрительного ощущения. Для этого необходимо формировать такие зрительные ощущения, которые можно было бы легко проанализировать. Значит, нужно определить зрительные картины, вызывающие появление в сознании человека зрительного ощущения заданного вида. Предположим, что зрительное ощущение задано в виде $B(x)$. Чтобы получить его, необходимо иметь зрительную картину, определяемую из (3) и (4) с учетом того, что зрительное ощущение однородно вдоль оси y :

$$V(x) = B(x) + \frac{k_k}{2\sqrt{1 - k_k n}} \int_{-\infty}^{\infty} B(\xi) e^{-\frac{|\xi - x| \sqrt{1 - k_k}}{a}} d\xi, \quad (19)$$

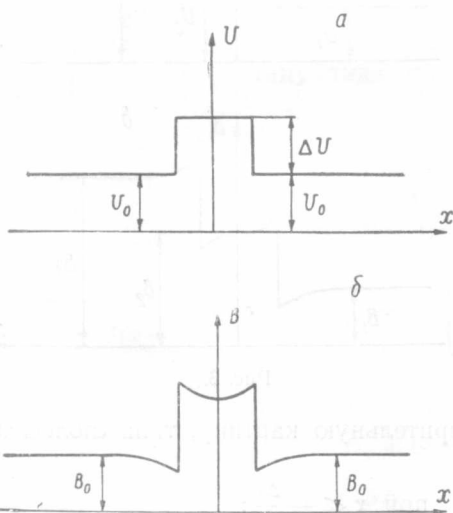


Рис. 4.

а яркость зрительной картины определяется из (6):

$$U = \frac{1}{c} (V - d). \quad (20)$$

Пусть светлота зрительного ощущения задана в виде

$$B(x) = \begin{cases} B_1 & \text{при } x \leq 0; \\ B_2 & \text{» } x > 0. \end{cases} \quad (20')$$

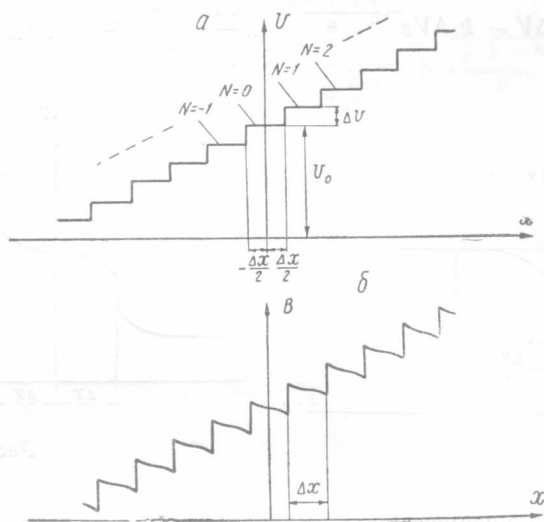


Рис. 5.

Тогда зрительная картина, вызвавшая такое зрительное ощущение, определяется подстановкой (20') в (19):

$$V(x) = \begin{cases} V_1 + \Delta V e^{-\frac{x \sqrt{1-k_k}}{n}} & \text{при } x \leq 0; \\ V_2 - \Delta V e^{-\frac{x \sqrt{1-k_k}}{n}} & \text{» } x > 0, \end{cases} \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} V_1 &= cU_1 + d; \\ V_2 &= cU_2 + d; \\ \Delta V &= \frac{1}{2} k_k c (U_2 - U_1). \end{aligned} \quad (22)$$

На рис. 6 показано изменение яркости зрительной картины.

Пусть светлота зрительного ощущения изменяется по закону «двойного скачка», т. е.

$$B(x) = \begin{cases} B_0 - \Delta B & \text{при } x \leq -\frac{\Delta x}{2}; \\ B_0 & \text{» } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}; \\ B_0 + \Delta B & \text{» } x \geq \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (23)$$

Нужный закон изменения яркости зрительной картины определится из (19) с учетом (23) и (20)

$$V(x) = \begin{cases} V_0 - \Delta V + k_k \Delta V e^{\frac{x \sqrt{1-k_k}}{n}} \operatorname{ch} \frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{2n} & \text{при } x \leq -\frac{\Delta x}{2}; \\ V_0 + k_k \Delta V e^{-\frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{2n}} \operatorname{sh} \frac{x \sqrt{1-k_k}}{n} & \text{при } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}; \\ V_0 + \Delta V - k_k \Delta V e^{-\frac{x \sqrt{1-k_k}}{n}} \operatorname{ch} \frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{2n} & \text{при } x > \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (24)$$

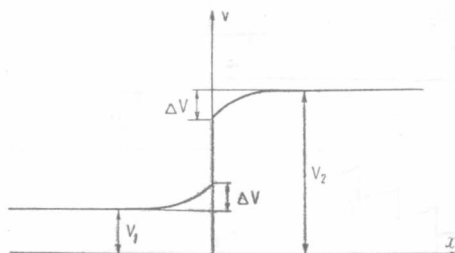


Рис. 6.

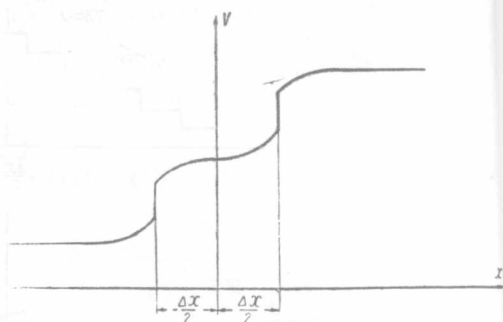


Рис. 7.

На рис. 7 показана диаграмма изменения яркости зрительной картины.

Рассмотрим случай, когда светлота зрительного ощущения соответствует «полоске», т. е. описывается условиями

$$B(x) = \begin{cases} B_0 & \text{при } x \leq -\frac{\Delta x}{2}; \\ B_0 + \Delta B & \text{« } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}; \\ B_0 & \text{« } x > \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (25)$$

Такой характер изменения светлоты зрительного ощущения соответствует изменению яркости зрительной картины по уравнениям

$$V(x) = \begin{cases} V_0 + k_k \Delta V e^{\frac{x \sqrt{1-k_k}}{n}} \operatorname{sh} \frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{2n} & \text{при } x \leq -\frac{\Delta x}{2}; \\ V_0 + \Delta V - k_k \Delta V e^{-\frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{2n}} \operatorname{ch} \frac{x \sqrt{1-k_k}}{n} & \text{при } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}; \\ V_0 + k_k \Delta V e^{-\frac{x \sqrt{1-k_k}}{n}} \operatorname{sh} \frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{2n} & \text{при } x \geq \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (26)$$

Соответствующая диаграмма изменения яркости зрительной картины представлена на рис. 8.

Если светлота зрительного ощущения представлена в виде «лесенки», т. е. изменяется по закону

$$B_N(x) = B_0 + N\Delta B$$

при $-\frac{\Delta x}{2} + N\Delta x < x \leq \frac{\Delta x}{2} + N\Delta x$, (27)

где N — номер ступеньки, то яркость зрительной картины для средней ступеньки $N = 0$ при $N \rightarrow \infty$ запишется в виде

$$V(x) = V_0 + k_k \Delta V \frac{e^{-\frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{2n}} - e^{-\frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{n}}}{1 - e^{-\frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{n}}} \operatorname{ch} \frac{x \sqrt{1-k_k}}{n},$$
 (28)

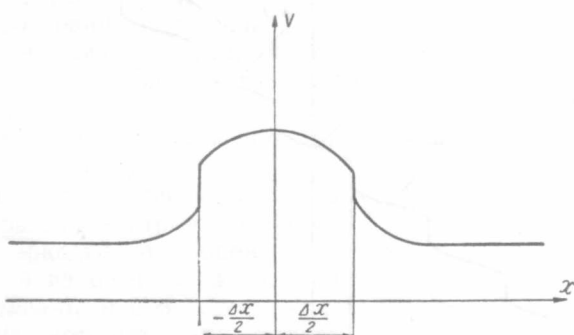


Рис. 8.

а для любой ступеньки

$$V(x) = (V_0 + N\Delta V) + k_k \Delta V \frac{e^{-\frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{2n}} - e^{-\frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{n}}}{1 - e^{-\frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{n}}} \operatorname{ch} \frac{(x - N\Delta x) \sqrt{1-k_k}}{n}$$
 (29)

при $-\frac{\Delta x}{2} + N\Delta x < x \leq \frac{\Delta x}{2} + N\Delta x$.

Для узких ступенек

$$V(x) = (V_0 + N\Delta V) + k_k \Delta V \frac{e^{-\frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{2n}} - e^{-\frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{n}}}{\left(1 - e^{-\frac{\Delta x \sqrt{1-k_k}}{n}}\right) n} \operatorname{ch} \frac{(x - N\Delta x) \sqrt{1-k_k}}{n}$$
 (30)

при $-\frac{\Delta x}{2} + N\Delta x < x \leq \frac{\Delta x}{2} + N\Delta x$.

Для узких и мелких ступенек

$$V(x) = (V_0 + N\Delta V) + k_k \Delta V \left(1 - \frac{\Delta x}{2n}\right) \sqrt{1-k_k} \frac{x - N\Delta x}{\Delta x}$$
 (31)

при $-\frac{\Delta x}{2} + N\Delta x < x \leq \frac{\Delta x}{2} + N\Delta x$.

На рис. 9 показана диаграмма изменения яркости зрительной картины. Для проверки полученных аналитических зависимостей проведены психофизические эксперименты с помощью диска (вертушки) Максвелла.

Методика постановки и проведения экспериментов состояла в следующем. Изготавливались кружки из бумаги ватман $\varnothing = 200$ мм и на них черной тушью вычерчивались специальные фигуры, дозировка и распределение яркости которых регулировались соотношением угловых размеров белого и черного секторов, а также изменением коэффициента отражения вдоль радиуса кружка. Опыты проводились при постоянной освещенности, поэтому яркость кружка пропорциональна коэффициенту отражения. Закручивая кружок со скоростью выше критической (при которой наступает слияние мельканий), получаем, согласно закону Тальбота, необходимые нам зрительные картины.

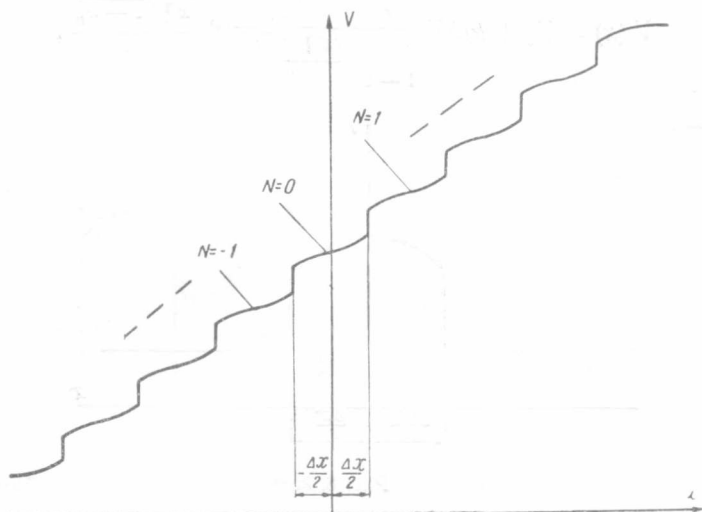


Рис. 9.

Опыты проводились с пятью испытуемыми.

Рассмотрим примеры проверки приведенных выше зависимостей. Для того, чтобы яркость зрительной картины изменялась в соответствии с (21), коэффициент отражения кружка должен изменяться по закону

$$\rho(x) = \begin{cases} \rho_1 + \frac{1}{2} k_k \Delta \rho e^{-\frac{(r-r_0) \sqrt{1-k_k}}{hn}} & \text{при } r \leq r_0; \\ \rho_2 - \frac{1}{2} k_k \Delta \rho e^{-\frac{(r-r_0) \sqrt{1-k_k}}{hn}} & \text{при } r > r_0, \end{cases} \quad (32)$$

где ρ_1 и ρ_2 — коэффициенты отражения, соответствующие яркостям U_1 и U_2 ;

$r_0 = 60$ мм — радиус, при котором происходит скачкообразное изменение яркости зрительной картины;

$h = 200$ мм — расстояние наблюдения.

Исходные данные для проведения опыта:

$$\rho_2 = 0,83; \quad \rho_1 = 0,75;$$

$$k_k = 0,9; \quad n = 20' = 0,0058 \text{ рад},$$

$\rho_0 = 0,83$ — коэффициент отражения белого ватмана,

$\rho_4 = 0,02$ — коэффициент отражения черной туши.

Расчетные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

φ , град	0	1	2	4	8	16	—	19,6	23,6	27,6	31,4	33,4	35,6
ρ	0,83	0,827	0,825	0,821	0,8119	0,794	—	0,786	0,776	0,766	0,759	0,754	0,75
r , мм	70,0	69,5	67,0	64,9	62,44	60	—	60	58,8	57,2	55,2	52,7	50,0

Соответствующая фигура, вычерченная тушью на кружке, имеет вид, изображенный на рис. 10.

Когда этот кружок вращается со скоростью, при которой наступает слияние мельканий, испытуемым предлагается оценить распределение светлоты зрительного ощущения вдоль радиуса. Все испытуемые наблюдали равномерное распределение светлоты от наружного края до границы раздела двух полей. Граница выглядит четкой, но не подчеркнутой и не размытой. Внутренний круг был другой яркости (более темный), светлота распределена равномерно от границы раздела к центру.

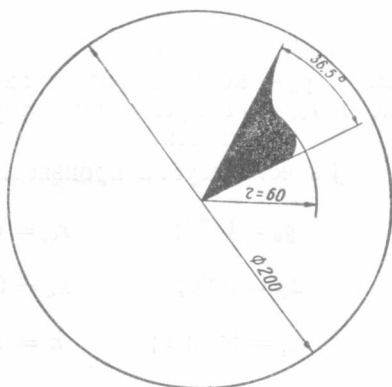


Рис. 10.

На рис. 11 представлена диаграмма изменения коэффициента отражения, пропорционального яркости зрительной картины, полученной из расчетного рисунка (пунктирная кривая), и семейство кривых, каждая из которых соответствует такому же рисунку, но с измененными в процессе эксперимента k_k и n . Пока изменения этих постоянных были небольшими, граница раздела оставалась четкой. При значительных изменениях кривой наблюдалось или размытие границы, или явление краевого контраста.

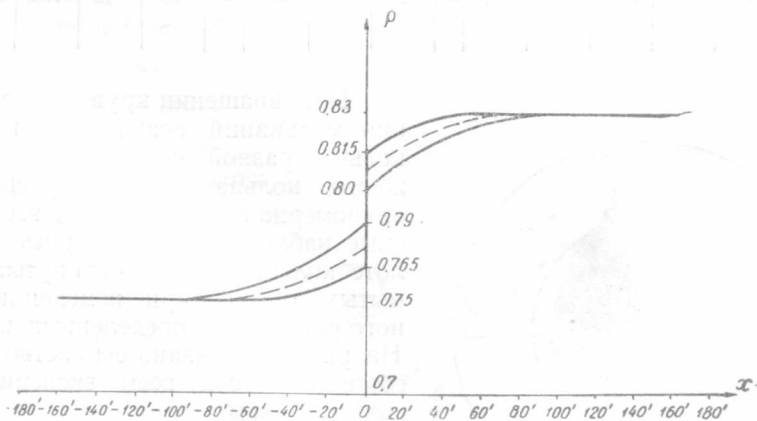


Рис. 11.

Для того чтобы зрительная картина вызывала «двойной скачок» светлоты зрительного ощущения, коэффициент отражения кружка должен изменяться по следующему закону:

$$\rho(x) = \begin{cases} \rho_0 - \Delta\rho + k_k \Delta\rho e^{-\frac{(r-r_0)\sqrt{1-k_k}}{hn}} \operatorname{ch} \frac{\Delta r \sqrt{1-k_k}}{2n} & \text{при } r \leq r_0; \\ \rho_0 + k_k \Delta\rho e^{-\frac{\Delta r \sqrt{1-k_k}}{2n}} \operatorname{sh} \frac{(r-r_0)\sqrt{1-k_k}}{2nh} & \text{при } r_0 < r \leq r_{0_2}; \\ \rho_0 + \Delta\rho - k_k \Delta\rho e^{-\frac{(r-r_0)\sqrt{1-k_k}}{nn}} \operatorname{ch} \frac{\Delta r \sqrt{1-k_k}}{2n} & \text{при } r > r_{0_2}; \end{cases} \quad (33)$$

где ρ_0 — коэффициент отражения, соответствующий яркости U_0 ; r_0 и r_{0_2} — радиусы, при которых происходит скачкообразное изменение яркости.

Расчет рисунка производился по следующим данным:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= 0,74; & r_{0_2} &= 60 \text{ мм}; & \rho_0 &= 0,83; \\ \Delta\rho &= 0,09; & k_k &= 0,9; & \rho_r &= 0,02; \\ r_{0_1} &= 50 \text{ мм}; & n &= 20' = 0,0058 \text{ рад}; & h &= 200 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Полученные данные сведены в табл. 2. На рис. 12 изображена фигура, вычерченная по данным этой таблицы.

Таблица 2

φ , град	0	2,8	5,7	7,7	15,5	...	33,4	40	47	...	61	66	72	75	80
ρ	0,830	0,823	0,816	0,812	0,787	...	0,755	0,74	0,725	...	0,693	0,681	0,664	0,659	0,650
r , мм	74,0	71,2	68,8	65,7	60,0	—	60,0	55	50	—	50	43	40,8	39,2	32,2

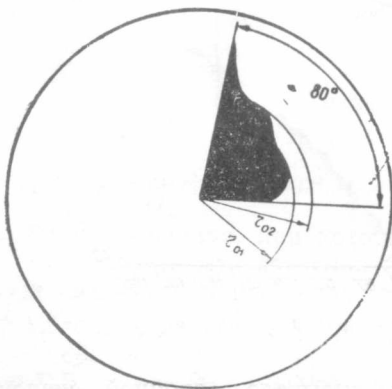


Рис. 12.

При вращении кружка после слияния мельканий испытуемые видят три кольца разной светлоты. Внутри каждого кольца светлота распределена равномерно вдоль радиуса; все испытуемые наблюдали равномерные по светлоте кольца без подчеркнутых и размытых границ при изменении расчетного рисунка в определенных пределах. На рис. 13 показано семейство кривых, соответствующее всем экспериментальным рисункам.

Зрительная картина, сформированная на диске вертушки, будет соответствовать формулам (26) и (20), если коэффициент отражения ρ поверхности диска изменяется вдоль радиуса по следующему закону:

$$\rho(x) = \begin{cases} \rho_0 + k_k \Delta \rho e^{\frac{(r-r_0) \sqrt{1-k_k}}{hn}} \operatorname{sh} \frac{\Delta r \sqrt{1-k_k}}{2nh} & \text{при } r-r_0 \leq -\frac{\Delta r}{2}; \\ \rho_0 + \Delta \rho - k_k \Delta \rho e^{-\frac{\Delta r \sqrt{1-k_k}}{2nh}} \operatorname{ch} \frac{(r-r_0) \sqrt{1-k_k}}{nh} & \text{при } -\frac{\Delta r}{2} < r-r_0 \leq \frac{\Delta r}{2}; \\ \rho_0 + k_k \Delta \rho e^{\frac{(r-r_0) \sqrt{1-k_k}}{nh}} \operatorname{sh} \frac{\Delta r \sqrt{1-k_k}}{2nh} & \text{при } r-r_0 > \frac{\Delta r}{2}, \end{cases} \quad (34)$$

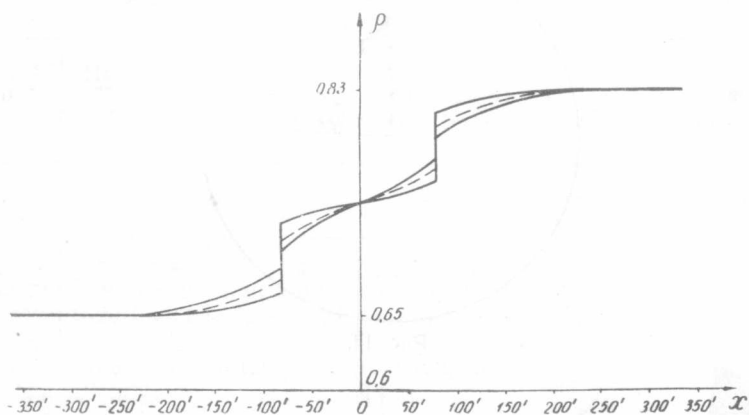


Рис. 13.

где Δr — ширина полосы, r_0 — радиус оси полосы.

Исходные данные для расчета рисунка:

$$\begin{aligned} \Delta r &= 5 \text{ мм}; & k_k &= 0,9; & \rho_0 &= 0,83; \\ r_0 &= 52,5 \text{ мм}; & n &= 0,0058 \text{ рад}; & \Delta \rho &= -0,08. \end{aligned}$$

Результаты расчета приведены в табл. 3. Фигура, вычерченная по данным таблицы, показана на рис. 14. При вращении ее наблюдатель видит кольцо на светлом фоне.

Таблица 3

φ , град	0	0,7	1,5	3,0	5,9	11,9	—	15,4	17,5	19,6
ρ	0,83	0,8285	0,827	0,823	0,815	0,803	—	0,795	0,791	0,786
r , мм	38,0	39,5	42,0	45,1	47,83	50	—	50	51,8	52,5
	67,2	65,5	63,0	59,9	57,17	55	—	55	53,9	52,5

Внутри кольца светлота распределена равномерно вдоль радиуса. Границы полосы четки, но не подчеркнуты. Размытия границ не наблюдается. При изменении рисунка границы казались четкими до определенного предела. На рис. 15 показано соответствующее семейство кривых.

Для того, чтобы зрительная картина вызвала зрительное ощущение типа «лесенка», коэффициент отражения кружка должен изменяться по следующему закону:

$$\rho(x) = (\rho_0 + N\Delta\rho) + k_k \Delta\rho \frac{e^{-\frac{\Delta r \sqrt{1-k_k}}{2nh}} [(r-r_0) - N\Delta r] \sqrt{1-k_k}}{\left(1 - e^{-\frac{\Delta r \sqrt{1-k_k}}{nh}}\right) nh}, \quad (35)$$

где N — номер ступеньки.

Исходные данные для расчета:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= 0,6; & r_0 &= 60 \text{ мм}; & h &= 200 \text{ мм}; & n &= 0,0058 \text{ рад}; \\ k_k &= 0,9; & \Delta r &= 5 \text{ мм}; & \Delta \rho &= 0,03. \end{aligned}$$

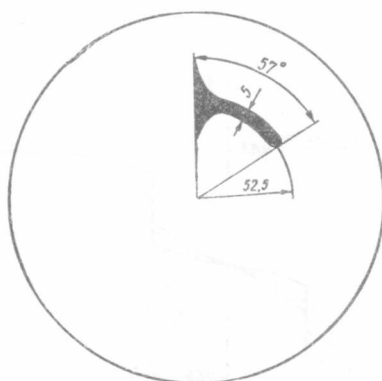


Рис. 14.

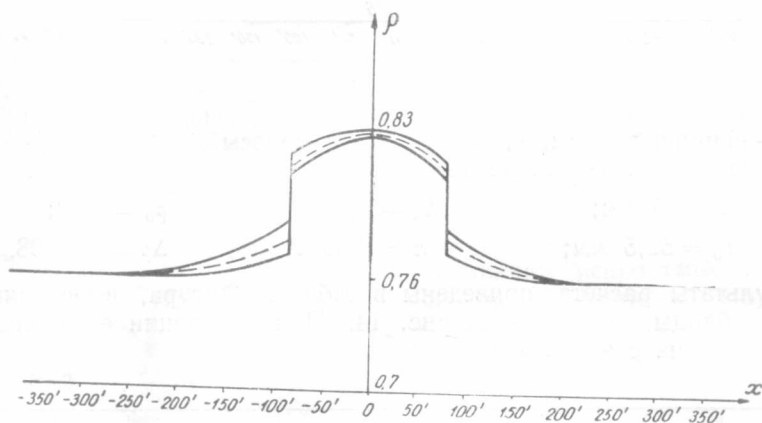


Рис. 15.

Расчетные данные сведены в табл. 4. Фигура, построенная по этим данным, показана на рис. 16.

При вращении этого кружка со скоростью, при которой наступает слияние мельканий, испытуемый видит ряд концентрических колец разной светлоты. Внутри каждого кольца светлота распределена равномерно. Границы между кольцами видны четко. Подчеркивания или размытия границ не наблюдается.

Таблица 4

N	0				1				2				3			
φ , град	96,5	97,5	102	106,8	91,2	89	86,6	83,4	80	78	75,6	69,8	64,8	62,4	60	56,6
ρ	0,62	0,61	0,6	0,589	0,625	0,63	0,64	0,642	0,649	0,655	0,66	0,673	0,685	0,69	0,695	0,702
$r-r_0$	2,5	2	0	-2	4	5	6	7,5	8	9	10	12,5	14	15	16	17,5
N	4				5				6							
φ	53,4	51,2	48,8	43,3	37,8	35,6	33,2	29,8	24,4	22,2	20,0	16,6				
ρ	0,709	0,715	0,72	0,732	0,745	0,75	0,7551	0,763	0,775	0,78	0,785	0,793				
$r-r_0$	18	19	20	22,5	24	25	26	27,5	29	30	31	32,5				
N	-1				-2				-3							
φ	114	115	118	121,5	126,5	129	131	135	140	142	145	148				
ρ	0,575	0,57	0,565	0,575	0,545	0,54	0,535	0,527	0,515	0,51	0,5049	0,497				
$r-r_0$	-4	-5	-6	-7,5	-9	-10	-11	-12,5	-14	-15	-16	-17,5				
N	-4				-5				-6							
φ	153,8	155	156	161,5	167	169	171	175	180	182	185	188				
ρ	0,4851	0,48	0,4749	0,467	0,455	0,45	0,444	0,437	0,425	0,42	0,4149	0,407				
$r-r_0$	-19	-20	-21	-22,5	-24	-25	-26	-27,5	-29	-30	-31	-32,5				

Выполненные расчеты и проведенные эксперименты показали, что предложенная линейная модель краевого контраста справедлива для различных входных сигналов при скачках яркости, не превышающих 10%, т. е. когда изображение на каком-то фоне слабоконтрастно. В этом случае механизм краевого контраста, подчеркивая контуры изображения, облегчает его анализ.

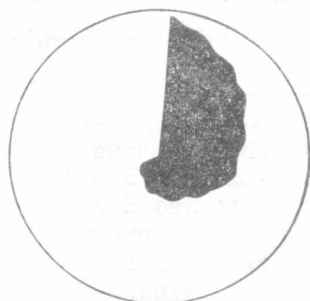


Рис. 16.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок. Математическая модель переработки информации в органе зрения человека. Сб. «Моделирование в биологии и медицине», вып. II, изд-во «Наукова думка», К., 1966.
 2. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, В. Я. Сердюченко. Математическая модель краевого контраста зрения. Сб. «Проблемы бионики», вып. 2, Изд-во ХГУ, 1969.